Исследование изменчивости характеристик атмосферных внутренних волн и их сигнатур над Тихоокеанским побережьем Российской Федерации

А. В. Скороходов, К. В. Курьянович

Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, 634055, Россия
E-mails: vazime@yandex.ru, ksuyain@mail.ru

Представлены результаты исследования изменчивости характеристик атмосферных внутренних волн и их сигнатур над Тихоокеанским побережьем Российской Федерации по спутниковым данным MODIS и результатам аэрологического зондирования в период с 2008 по 2017 г. Расчёт геометрических признаков облачных проявлений волновых процессов основан на использовании изображений из космоса в видимом диапазоне спектра. Восстановление физических параметров атмосферных внутренних волн и сопутствующих условий окружающей среды осуществляется применением тематических продуктов спутниковой съёмки и результатов аэрологического зондирования. Приведены результаты анализа повторяемости исследуемых волновых процессов и локализации участков наблюдения их сигнатур над рассматриваемым регионом. Изложены результаты построения годового хода различных характеристик атмосферных внутренних волн за указанный промежуток времени. Обсуждаются результаты анализа межгодовой изменчивости параметров волновых процессов и их облачных проявлений. Выдвигаются гипотезы относительно причин и условий возникновения рассматриваемых явлений над Тихоокеанским побережьем Российской Федерации.

Ключевые слова: атмосферные внутренние волны, гравитационные волны, климат, облачность, орографические волны, спутниковые данные, характеристики волн

Одобрена к печати: 04.09.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-245-253

Введение

В настоящее время волновые процессы относятся к одним из наименее изученных явлений в атмосфере Земли. При этом существует несколько типов атмосферных волн, отличающихся причинами их генерации и характеристиками, основными из которых являются акустические, внутренние и планетарные. Акустические волновые процессы возникают вследствие сжимаемости воздуха (Госсард, Хук, 1978). Генерация внутренних волн обусловлена несколькими факторами, такими как сила тяжести, конвекция, струйные течения, рельеф подстилающей поверхности и др. (Дикий, 1969). Основной причиной возникновения планетарных волновых процессов является изменчивость с широтой силы Кориолиса (Онищенко и др., 2007). В реальной атмосфере часто встречаются смешанные их типы (Plougonven, Zhang, 2014). Однако наибольший интерес представляют атмосферные внутренние волны. Это связано в первую очередь с предположениями об их взаимосвязи с различными климатическими процессами: переносом энергии, общей циркуляцией, образованием ураганов и др. (Coleman, Knapp, 2008). Кроме этого, атмосферные внутренние волны относятся к авиационным факторам риска, а также влияют на модуляцию показателя преломления, приводящую к искажению оптических и радиосигналов (Авиационные..., 2007).

Традиционными способами регистрации внутренних волновых процессов являются методы зондирования: акустическое, лидарное и радиолокационное (Камардин и др., 2014). Однако перечисленные подходы позволяют осуществлять хоть и регулярные, но достаточно локальные наблюдения за рассматриваемыми явлениями. При этом над водной поверхностью их эпизодическое детектирование является сопутствующим результатом других экспериментов. Несмотря на это, необходимые условия для генерации и распространения атмосферных внутренних волн известны: наличие устойчивой стратификации, присутствие струйных течений нижнего уровня и температурная инверсия (Госсард, Хук, 1978). В настоящее время для

изучения внутренних волновых процессов активно привлекаются данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Так, на спутниковых снимках видимого диапазона спектра атмосферные внутренние волны проявляются в виде групп квазипараллельных полос протяжённостью до нескольких сотен километров, образованных облаками нижнего и среднего ярусов. Согласно современным представлениям такие тропосферные волны подразделяются на гравитационные и орографические (Nappo, 2013; Pedlosky, 2003). Возникновение первых обусловлено нарушением устойчивости нескольких тонких слоёв температурной инверсии под воздействием различных факторов, например конвекции. Вторая разновидность образуется при натекании тёплых воздушных масс на препятствие с последующим их перемешиванием со встречным холодным воздухом. В обоих случаях возникают колебательные движения воздуха под воздействием силы тяжести, а на гребнях волн происходит конденсация влаги с последующим образованием облаков различных типов.

Результаты спутниковой съёмки позволили выделить регионы с наибольшей повторяемостью атмосферных гравитационных и орографических волн. Однако в настоящее время по-прежнему отсутствует комплексная параметризация исследуемых явлений. Рассмотрены и описаны лишь единичные эпизоды наблюдения атмосферных внутренних волн (Lutzak, 2013). При этом детальный анализ указанных волновых процессов над отдельно взятыми регионами позволит не только выявить источники и условия их возникновения, но и оценить взаимосвязь с различными атмосферными и климатическими процессами, а также жизнедеятельностью человека. Одним из таких регионов является Тихоокеанское побережье Российской Федерации в районе Курильских островов, п-ва Камчатка и о. Сахалин. При этом над указанными территориями наблюдаются как орографические, так и гравитационные волны. Следует отметить, что данный регион характеризуется развитой вертолётной инфраструктурой и малой авиацией, на полёты которой рассматриваемые явления способны оказать негативное воздействие (Рябухин, 2013).

Поэтому целью работы стало исследование характеристик атмосферных внутренних волн и их сигнатур над Тихоокеанским побережьем Российской Федерации по многолетним спутниковым данным и результатам аэрологического зондирования, а также оценка их изменчивости.

Исходные данные

Восстановление параметров атмосферных внутренних волн в данной работе осуществлялось на основе применения результатов спутниковой съёмки MODIS и аэрологического зондирования на метеостанциях изучаемого региона, полученных в период с 2008 по 2017 г. При этом использовались изображения из космоса с пространственным разрешением 250 м (0,62–0,67 мкм), а также тематические продукты MOD06_I2 и MYD06_I2, содержащие информацию о характеристиках облачного покрова (<https://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/products/cloud>). Рассматривались данные со следующих метеостанций: Ключи, Кусиро, Немуро, Петропавловск-Камчатский, Северо-Курильск, Соболево и Южно-Сахалинск. Следует отметить, что время фиксации данных на указанных метеостанциях хорошо согласуется с пролётами спутников Тегга и Aqua, на борту которых установлен спектрорадиометр MODIS.

Визуальное дешифрование спутниковых снимков позволило выделить эпизоды наблюдения атмосферных внутренних волн над Тихоокеанским побережьем

Рис. 1. Повторяемость атмосферных внутренних волн над Тихоокеанским побережьем Российской Федерации

Российской Федерации. Для этого осуществлялся поиск групп квазипараллельных полос, образуемых облаками различных типов, на изображениях из космоса в видимом диапазоне спектра. На *рис. 1* (см. с. 246) приведена повторяемость исследуемых явлений, которая свидетельствует о регулярном их появлении над рассматриваемым регионом. Количество эпизодов наблюдения атмосферных внутренних волн в среднем равняется 95 в год. Однако 2012 г., в котором зафиксировано всего 50 таких случаев, выбивается из общего тренда, выявление причин которого является перспективным направлением развития настоящей работы.

На *рис. 2* показаны типичные для данного региона сигнатуры атмосферных орографических и гравитационных волн. Из *рис. 2а* видно, что способствующим к образованию волновых процессов фактором является Курильская островная гряда. Приведённые же на *рис. 2б* облачные проявления атмосферных волн находятся на значительном удалении от береговой линии и расположены перпендикулярно ей.

Рис. 2. Типичные сигнатуры атмосферных орографических (*а*) и гравитационных (*б*) волн над Тихоокеанским побережьем Российской Федерации

Описание найденных эпизодов наблюдения атмосферных внутренних волн осуществлялось на основе использования геометрических признаков квазипараллельных полос сигнатур и физических характеристик облачности, их формирующих, а также сопутствующих условий окружающей среды. Для восстановления указанных параметров применялись разработанные нами ранее методы и алгоритмы (Скороходов, Курьянович, 2018). Использовались следующие характеристики исследуемых волновых процессов: площадь S , толщина W , протяжённость L и число N квазипараллельных полос, амплитуда A , длина λ , период T , скорость v и направление θ распространения волн. Сопутствующими параметрами являлись: температура $T_{\text{вг}}$, высота $h_{\text{вг}}$ и давление $p_{\text{вг}}$ на верхней границе облаков и их тип Q , а также температура подстилающей поверхности $T_{\text{пп}}$. Кроме этого, для каждого эпизода наблюдения атмосферных внутренних волн выполнялась проверка необходимых условий для их генерации: наличие струйных течений, устойчивая стратификация и температурные инверсии.

Рис. 3. Годовой ход повторяемости атмосферных внутренних волн над Тихоокеанским побережьем Российской Федерации

Рис. 4. Регионы появления сигнатур атмосферных внутренних волн: отдельно по годам (а–в) и в целом за рассматриваемый период (г)

Результаты анализа характеристик атмосферных внутренних волн

Описание эпизодов наблюдения атмосферных внутренних волн по многолетним спутниковым и аэрологическим данным позволяет построить их годовой ход, а также определить их межгодовую и сезонную изменчивость.

На *рис. 3* (см. с. 248) показан годовой ход повторяемости исследуемых явлений за четыре года, которая имеет ярко выраженную сезонную изменчивость. В остальные годы сезонные вариации атмосферных внутренних волн аналогичны. Периоды наибольшего числа наблюдений исследуемых волновых процессов приходятся на весну и осень. Анализируя климатические условия региона, можно предположить, что это связано с частым возвратом тёплых воздушных масс в октябре и ноябре на фоне холодной погоды и сильных ветров. Весенний же пик меняется от года к году с февраля по май, чему, возможно, способствует непостоянство режимов вскрытия Берингова, Охотского и Японского морей ото льда.

На *рис. 4* (см. с. 248) жёлтым цветом выделены области наблюдения сигнатур атмосферных внутренних волн над исследуемым регионом за конкретные годы и в целом за весь рассматриваемый период времени. Также на *рис. 4г* красным обозначены основные участки возникновения волновых процессов: акватория Курильских островов, южная часть п-ва Камчатка, островов Сахалин и Хоккайдо. При этом чем больше диаметр окружностей, тем выше повторяемость наблюдения сигнатур атмосферных внутренних волн. С одной стороны, это свидетельствует о преобладании орографической природы возникновения волновых процессов в данном регионе. С другой — наличие участков, значительно удалённых от береговой линии, говорит и о генерации атмосферных гравитационных волн. Это подтверждается ориентацией квазипараллельных полос на спутниковых снимках MODIS, а также их протяжённостью и формой.

На *рис. 5* (см. с. 250) показана межгодовая изменчивость некоторых характеристик атмосферных внутренних волн, наблюдаемых над Тихоокеанским побережьем Российской Федерации. Здесь красной линией обозначен линейный тренд, демонстрирующий динамику изменения рассматриваемых параметров за исследуемый промежуток времени. При этом на *рис. 5* представлены три ситуации: положительный (*рис. 5а* и *б*), отрицательный (*рис. 5в* и *г*) и нейтральный (*рис. 5д* и *е*) тренды. Так, площадь сигнатур атмосферных внутренних волн увеличилась в среднем на 27 %, а амплитуда волнового процесса — на 24 %. Кроме этого, положительный тренд наблюдается у толщины и протяжённости квазипараллельных полос, а также скорости распространения исследуемых явлений. Практически на 30 % сократилось число полос и на 3 % снизилась температура верхней границы облаков. Отрицательная динамика характерна также для давления на верхней границе облаков. Остальные параметры атмосферных внутренних волн, рассматриваемые в работе, имеют нейтральный тренд. Особенно интересным представляется слабая изменчивость температуры подстилающей поверхности на фоне значительных сезонных вариаций, что видно из *рис. 5е*. Резюмируя полученные результаты, можно сделать основной вывод о том, что увеличивается площадь участков наблюдения сигнатур атмосферных внутренних волн, их амплитуда и скорость распространения над рассматриваемым регионом планеты. Однако для выявления причин этого необходимо привлекать дополнительные параметры, например повторяемость атмосферных фронтов и интенсивность океанического апвеллинга.

На *рис. 6* (см. с. 251) приведена диаграмма повторяемости различных типов облачности, из которых формировались сигнатуры атмосферных внутренних волн над рассматриваемым регионом, а также роза ветров. Из *рис. 6а* видно, что преобладающими разновидностями облаков являются высококучевые кучевообразные (Ac cuf), слоисто-кучевые кучевообразные (Sc cuf) и слоисто-дождевые (Ns). Согласно справочнику (Облака..., 1989), высокая повторяемость перечисленных типов облачности свидетельствует о преобладании процессов конвекции, а также волновых движений над подветренными склонами возвышенностей и развитии атмосферных фронтов. Можно предположить, что именно эти факторы являются определяющими при генерации и распространении атмосферных внутренних волн над регионом с учётом особенностей его рельефа. На *рис. 6б* видно, что основной курс распространения волновых

процессов направлен в сторону от материка. Согласно исследованию (Переведенцев и др., 2013), это соответствует направлению общей циркуляции атмосферы на соответствующих высотах в рассматриваемом регионе планеты. Однако наблюдаются эпизоды распространения атмосферных внутренних волн вдоль Курильской островной гряды. Анализ соответствующих сигнатур по спутниковым снимкам свидетельствует о гравитационной природе их происхождения. Таким образом, основным типом наблюдаемых атмосферных внутренних волн над рассматриваемым регионом являются орографические.

Рис. 5. Межгодовая изменчивость характеристик атмосферных внутренних волн и их сигнатур: *a* — площади, *б* — амплитуды, *в* — числа полос, *г* — температуры верхней границы облаков, *д* — периода и *е* — температуры подстилающей поверхности

В таблице представлены средние и преобладающие значения исследуемых параметров атмосферных внутренних волн. Их можно рассматривать в качестве характеристик «типичного» для Тихоокеанского побережья РФ волнового процесса. Кроме этого, полученные значения могут быть использованы для оценки влияния атмосферных внутренних волн на различные процессы, происходящие в системе «атмосфера – подстилающая поверхность», а также жизнедеятельность человека в данном регионе планеты.

Средние и преобладающие значения характеристик атмосферных внутренних волн и их сигнатур, наблюдаемых над Тихоокеанским побережьем Российской Федерации с 2008 по 2017 г.

S , км ²	W , км	L , км	N	A , м	λ , км	T , ч	v , км/ч	θ , град	$T_{ВГ}$, К	$H_{ВГ}$, м	$p_{ВГ}$, гПа	Q	$T_{ПП}$, °С
74 193	3,48	323,16	9	810	7,61	0,10	102,72	248,87	262,30	2409,75	756,57	Ac cuf	5,43

Рис. 6. Наиболее характерные типы облачности в сигналах атмосферных внутренних волн (а) и направления их распространения (б) над Тихоокеанским побережьем Российской Федерации

Заключение

Основной результат работы заключается в определении межгодовой изменчивости различных характеристик атмосферных внутренних волн и их сигнатур над Тихоокеанским побережьем Российской Федерации по спутниковым данным MODIS и результатам аэрологических измерений с 2008 по 2017 г. Повторяемость исследуемых явлений имеет ярко выраженный годовой ход с пиковыми значениями в весенне-осенние периоды. Среднее значение этого показателя равняется 95 дням. Наибольшее отклонение данного параметра наблюдалось в 2012 г. (50 дней). Основными участками наблюдения сигнатур атмосферных внутренних волн являются акватория Курильских островов, п-ов Камчатка, о-ва Сахалин и Хоккайдо. За рассматриваемый период времени зафиксировано существенное увеличение площади квази-параллельных полос, а также амплитуды и скорости волнового процесса. Оценка возможных причин и последствий таких изменений является перспективным направлением развития настоящей работы. На основе анализа преобладающих типов облачности, формирующих сигнатуры волновых процессов, определены ключевые факторы для их генерации: конвекция (Ac cuf), рельеф подстилающей поверхности (Sc cuf) и развитие атмосферных фронтов (Ns). Установлено, что наибольшей повторяемостью над исследуемым регионом обладают атмосферные орографические волны, направление распространения которых совпадает с общей циркуляцией атмосферы на соответствующих высотах. Анализ же причин и источников возникновения здесь атмосферных гравитационных волн является перспективной темой исследований. Для этого целесообразным будет привлечение результатов геостационарной спутниковой съёмки, которая позволит изучить изменчивость характеристик волновых процессов и их сигнатур в течение времени их жизни. Определены средние значения параметров атмосферных внутренних волн и их сигнатур для рассматриваемого региона, которые могут быть использованы для оценки их влияния на различные атмосферные процессы и сферы жизнедеятельности человека.

Работа в части исследования атмосферных внутренних волн выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-1745.2018.5, в части классификации облачности — в рамках государственного заказа Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (рег. № AAAA-A17-117021310142-5).

Литература

1. Авиационные факторы риска. Программа обучения и подготовки ETR № 20. Женева: Изд-во ВМО, 2007. 53 с.
2. Госсард Э. Э., Хук У. К. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.
3. Дикий Л. А. Теория колебаний земной атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 196 с.
4. Камардин А. П., Одинцов С. Л., Скороходов А. В. Идентификация внутренних гравитационных волн в атмосферном пограничном слое по данным содара // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7. С. 812–818.
5. Облака и облачная атмосфера: Справочник / под ред. Мазина И. П., Хргиана А. Х. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 647 с.
6. Онищенко О. Г., Похотелов О. А., Астафьева Н. М. Планетарные волны в атмосфере. Обзор. М.: ИКИ РАН, 2007. 32 с.
7. Переведенцев Ю. П., Мохов И. И., Елисеев А. В., Шанталинский К. М., Важнова Н. А. Теория общей циркуляции атмосферы: учеб. пособие. Казань: Казанский ун-т, 2013. 224 с.
8. Рябухин С. Н. Развитие малой авиации в Российской Федерации // Дискуссионный клуб: Экспертное мнение. 2013. № 1. С. 347–354.
9. Скороходов А. В., Курьянович К. В. Методы и алгоритмы восстановления характеристик атмосферных внутренних волн на основе спутниковых данных и результатов аэрологического зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 24–31.
10. Coleman A. T., Knupp K. R. The interactions of gravity waves with mesocyclones: preliminary observations and theory // Monthly Weather Review. 2008. V. 136. P. 4206–4219.
11. Lutzak P. A. A proposal for analyzing and forecasting loweratmospheric undular bores in the western Gulf of Mexico region // Weather Forecasting. 2013. V. 28. P. 55–76.
12. Nappo C. J. An introduction to atmospheric gravity waves. San Diego: Academic Press, 2013. 359 p.
13. Pedlosky J. Waves in the ocean and atmosphere. Introduction to wave dynamics. Berlin: Springer, 2003. 260 p.
14. Plougonven R., Zhang F. Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts // Reviews of Geophysics. 2014. V. 52. P. 1–37.

A study of variability characteristics of atmospheric internal waves over the Russian Federation Pacific coast

A. V. Skorokhodov, K. V. Kuryanovich

V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk 634055, Russia
E-mails: vazime@yandex.ru, ksuyain@mail.ru

Characteristics of atmospheric internal waves and their signatures over the Russian Federation Pacific coast are studied using MODIS satellite data and results of upper-air sounding from 2008 to 2017. We consider the geometric features of cloud manifestations of wave processes using images from space in the visible light spectrum. We restore the physical parameters of atmospheric internal waves and the current environmental state by the satellite data products and results of upper-air sounding. The results of the analysis of frequency of the studied wave processes and localization of their signatures observation areas are presented. The annual behavior of various characteristics of atmospheric internal waves for a specified period of time is shown. The results of the analysis of interannual variability of parameters of wave processes and their cloud manifestations are discussed. Hypotheses are put forward regarding the causes and conditions of the occurrence of atmospheric internal waves over the Russian Federation Pacific coast.

Keywords: atmospheric internal waves, gravity waves, climate, cloudiness, orographic waves, satellite data, wave characteristics

Accepted: 04.09.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-245-253

References

1. *Aviatsionnye faktory riska. Programma obucheniya i podgotovki ETR No. 20* (Aviation risk factors. ETR No. 20 education and training program), Zheneva: Izd. VMO, 2007, 53 p.
2. Gossard E. E., Khuk U. K., *Volny v atmosfere* (Waves in the atmosphere), Moscow: Mir, 1978, 532 p.
3. Dikii L. A., *Teoriya kolebaniy zemnoi atmosfery* (Theory of Earth atmosphere oscillations), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1969, 196 p.
4. Kamardin A. P., Odintsov S. L., Skorokhodov A. V., Identifikatsiya vnutrennikh gravitatsionnykh voln v atmosfernom pogranichnom sloe po dannym sodara (Identification of internal gravity waves in the atmospheric boundary layer according to sodar data), *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 7, pp. 812–818.
5. *Oblaka i oblachnaya atmosfera: Spravochnik* (Clouds and cloudy atmosphere. Handbook), Mazin I. P., Khrgian A. Kh. (eds.), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989, 647 p.
6. Onishchenko O. G., Pokhotelov O. A., Astaf'eva N. M., *Planetarnye volny v atmosfere. Obzor* (Planetary waves in the atmosphere. Overview), Moscow: IKI RAN, 2007, 32 p.
7. Perevedentsev Yu. P., Mokhov I. I., Eliseev A. V., Shantalinskii K. M., Vazhnova N. A., *Teoriya obshchei tsirkulyatsii atmosfery* (Theory of the general circulation of the atmosphere: a training manual), Kazan: Kazanskii universitet, 2013, 224 p.
8. Ryabukhin S. N., Razvitie maloi aviatsii v Rossiiskoi Federatsii (Development of small aircraft in the Russian Federation), *Diskussionnyi klub: Ekspertnoe mnenie*, 2013, No. 1, pp. 347–354.
9. Skorokhodov A. V., Kuriyanovich K. V., Metody i algoritmy vosstanovleniya kharakteristik atmosferykh vnutrennikh voln na osnove sputnikovykh dannykh i rezul'tatov aerologicheskogo zondirovaniya (Methods and algorithms for retrieving the characteristics of atmospheric internal waves from satellite data and results of aerologic sensing), *Sovremennye Problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 24–31.
10. Coleman A. T., Knupp K. R., The interactions of gravity waves with mesocyclones: preliminary observations and theory, *Monthly Weather Review*, 2008, Vol. 136, pp. 4206–4219.
11. Lutzak P. A., A proposal for analyzing and forecasting loweratmospheric undular bores in the western Gulf of Mexico region, *Weather Forecasting*, 2013, Vol. 28, pp. 55–76.
12. Nappo C. J., An introduction to atmospheric gravity waves. San Diego: Academic Press, 2013, 359 p.
13. Pedlosky J., Waves in the ocean and atmosphere. Introduction to wave dynamics. Berlin: Springer, 2003, 260 p.
14. Plougonven R., Zhang F., Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts, *Reviews of Geophysics*, 2014, Vol. 52, pp. 1–37.